

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.18.006

2023年滇池水质波动原因分析及措施研究

吴雪^{1,2}, 朱启凤², 张英², 王燕彩², 董蕾²

(1. 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明市生态环境科学研究院, 云南 昆明 650032)

摘要: 自2018年以来,滇池全湖水质已连续6年保持在地表水IV类水平,但2023年湖体水质有所波动,特别是6月和7月COD超过40 mg/L、TP超过0.1 mg/L。对2018年—2023年滇池水质变化趋势进行了分析,并深入查找2023年滇池水质波动的原因。结果表明,气象、出入湖水量、入湖河道水质水量等因素共同导致2023年滇池水质的波动。一方面,受高温影响,2023年滇池蓝藻水华为近6年最严重,增大了湖体内源污染;另一方面,2023年牛栏江-滇池补水量和海口闸下泄水量均为近6年的最小值,湖泊换水周期延长至9.69年,造成污染物在湖内浓缩、累积;此外,流域污染治理还存在短板,汛期污染尤为严重,雨季入湖污染负荷为旱季的1.5~2.5倍,溢流和降雨径流污染控制亟待加强。为进一步巩固和提升滇池水质,建议拓宽滇池补水水源,优化水资源调度和配置;补齐污染治理短板,降低汛期污染强度;精准治理,实现资源配置效率最优化和效益最大化。上述措施有助于全面提升滇池全湖水质,有效控制富营养化问题,逐步恢复水生态系统功能。

关键词: 滇池; 水质波动; 原因分析; 对策

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)18-0034-09

Water Quality Fluctuation in Dianchi Lake, China (2023): Anthropogenic Drivers and Synergistic Control Mechanisms

WU Xue^{1,2}, ZHU Qi-feng², ZHANG Ying², WANG Yan-cai², DONG Lei²

(1. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Kunming Institute of Eco-Environmental Science, Kunming 650032, China)

Abstract: Since 2018, the annual average water quality of Dianchi Lake has maintained class IV of surface water standard for six years. However, the water quality of the lake fluctuated in 2023, with COD exceeding 40 mg/L and TP exceeding 0.1 mg/L, particularly in June and July. This paper analyzes the trend of water quality change in Dianchi Lake from 2018 to 2023, and further investigates the causes of water quality fluctuation in 2023. The results show that the water quality fluctuation in Dianchi Lake in 2023 was caused by meteorological factors, the volume of water inflow and outflow, and the quality of inflow rivers. On the one hand, the temperature in 2023 was the highest in history. Under the elevated temperatures, cyanobacterial blooms were the most severe in the past six years. The accumulation and decomposition of cyanobacteria in the lake increased the internal pollution load. In 2023, the

基金项目: 长江生态环境保护修复联合研究(二期)项目(2022-LHYJ-02-0511-01); 云南省技术创新人才培养对象项目(202305AD160060)

通信作者: 朱启凤 E-mail: 542587348@qq.com

replenishment water of Niulan River–Dianchi Lake and the discharge water were the lowest volumes in the past six years. This reduction in water inflow and outflow extended the lake's water exchange cycle to 9.69 years, leading to the concentration and accumulation of pollutants. Additionally, there were still shortcomings in watershed pollution control, with particularly severe pollution during the rainy season. The pollution load entering the lake during the rainy season was 1.5–2.5 times that of the dry season. Therefore, the control of overflow and rainfall runoff pollution needs to be strengthened. To further consolidate and improve the water quality of Dianchi Lake, it is suggested to broaden the water source and optimize water resource scheduling and allocation. It is also necessary to address the weaknesses in pollution control, particularly reducing the intensity of pollution during the rainy season, and to optimize resource allocation more precisely and efficiently to maximize benefits. By taking the above measures, the water quality of Dianchi Lake can be improved, the eutrophication problem can be effectively controlled, and the function of the water ecosystem can be gradually restored.

Key words: Dianchi Lake; water quality fluctuation; cause analysis; countermeasures

滇池是昆明市工农业生产的重要水源,也是城市备用饮用水源。自“九五”以来滇池被列入国家重点治理的“三河三湖”之一,经过多年的治理,2016年滇池水质由持续20多年的地表水劣V类改善为全湖地表水V类,2018年上升为地表水IV类,至2023年底滇池全湖水质已连续6年保持在地表水IV类水平,治理取得阶段性成效。然而,2023年6月—7月,滇池湖体水质恶化至地表水劣V类,为“十四五”以来首次出现地表水劣V类的情况。为掌握滇池湖体水质波动的原因,对滇池近6年水质进行分析,重点从气象因素、出入湖水量、入湖河道水质水量等方面诊断排查2023年滇池水质波动原因,并探讨了当前滇池治理存在问题和对策建议。该研究提供了一种湖泊水质恶化倒查的思路,可为滇池和其他富营养化湖泊水质波动问题诊断提供参考。

1 研究背景与方法

1.1 研究区域概况

滇池位于昆明主城区南部,处于长江、红河、珠江分水岭地带,属长江流域。滇池流域面积2920 km²,主要入湖河流35条,出水经西园隧道、海口闸排入下游的螳螂川。滇池湖岸线长163.0 km,正常高水位为1887.5 m,平均水深5.3 m,湖面面积309.5 km²,湖容15.6×10⁸ m³,多年平均入湖径流量为9.8×10⁸ m³,湖面蒸发量4.4×10⁸ m³。1996年海埂大坝建成后,滇池被分为草海和外海。其中,草海湖面面积10.8 km²,平均水深2.3 m,湖容0.3×

10⁸ m³,注入主要河道7条;外海湖面面积298.7 km²,平均水深5.3 m,湖容15.3×10⁸ m³,注入主要河道26条。滇池草海和外海的水功能区划目标分别为地表水IV类和Ⅲ类,由于短期内难以达到水功能区划目标,“十四五”期间国家、省、市设定滇池水质目标为:草海稳定达到地表水IV类,外海达到地表水IV类(COD≤40 mg/L)。

1.2 数据来源

采用的河湖水质水量数据分别来自昆明市生态环境局和昆明市滇池管理局,气象数据来自昆明市气象局。其中,滇池湖体水质评价数据包括草海中心、断桥、白鱼口、滇池南、观音山中、观音山东、观音山西、灰湾中、罗家营、海口西10个国控点位;35条入湖河道水质评价数据包括12个国控断面、7个省控断面和16个市控断面。

1.3 研究方法

按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),采用单因子法对湖体水质进行评价。同时,采用综合污染指数法^[1-2]进行综合评价,计算公式为:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

$$P_i = \frac{C_i}{L_i} \quad (2)$$

式中: P 为综合污染指数; n 为水质因子个数; P_i 为水质因子 i 的污染指数; C_i 为水质因子 i 的实测浓度,mg/L; L_i 为《地表水环境质量标准》(GB 3838—

2002)中水质因子*i*的IV类标准值,mg/L。

当 $P \leq 0.25$ 时,表示水体清洁; $0.25 < P \leq 0.40$ 时,表示水体较清洁; $0.40 < P \leq 0.99$ 时,表示水体处于中污染状态; 当 $P \geq 1.00$ 时,表示水体处于重污染状态^[2]。

采用流量加权平均法^[3]进行入湖河流水质评价,计算公式如下:

$$C = \sum_{k=1}^m q_k \frac{C_k}{Q} \quad (3)$$

$$Q = \sum_{k=1}^m q_k \quad (4)$$

式中: C 为 m 个断面水质检测结果平均值; C_k 为第 k 个断面水质监测结果; q_k 为第 k 个断面水量监测结果; Q 为 m 个断面水量监测结果的加和值。

2 结果与讨论

2.1 滇池水质状况分析

2.1.1 滇池水质现状及变化趋势

2018年—2023年滇池水质变化趋势见图1。

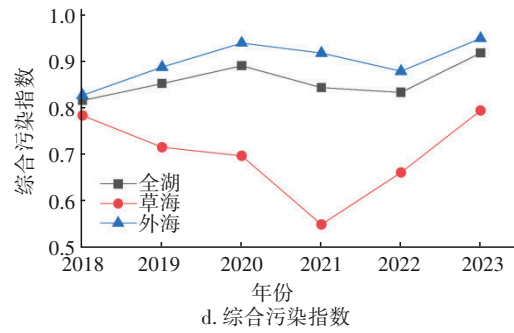
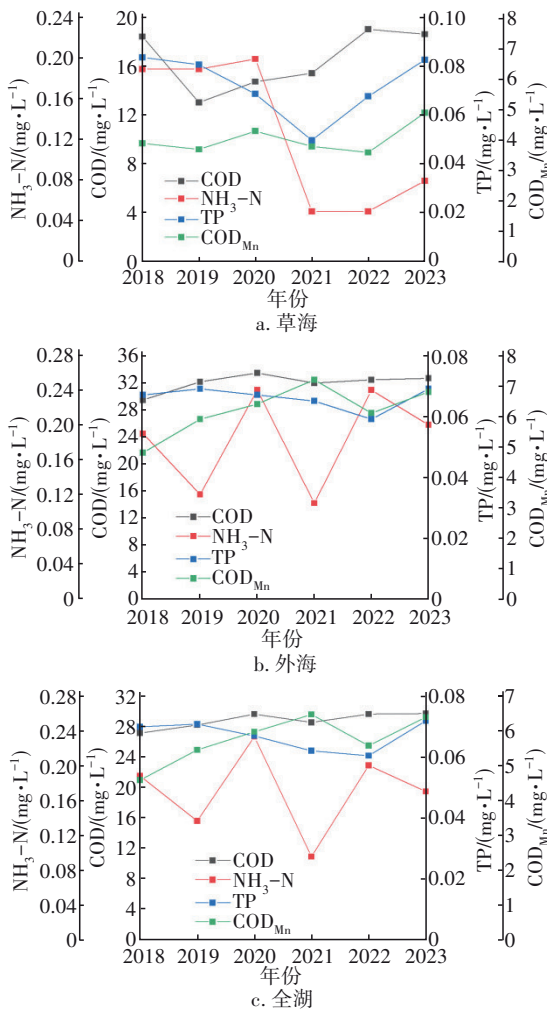


图1 2018年—2023年滇池水质变化趋势

Fig.1 Variation trend of water quality of Dianchi Lake from 2018 to 2023

由图1可知,2023年滇池全湖平均水质类别为地表水IV类,主要水污染指标COD、TP和 COD_{Mn} 分别为29.8、0.072、6.4 mg/L,其他指标均达到或优于地表水III类。与2022年水质对比,2023年滇池的 NH_3-N 和叶绿素a(Chla)指标呈现改善趋势,但TP、 COD_{Mn} 和COD指标有所恶化,浓度分别上升18.0%、14.3%和0.3%。从不同湖区来看,草海水质下降趋势比外海明显。2023年,草海 COD_{Mn} 、 NH_3-N 、TP浓度较2022年分别升高36.1%、33.3%、22.1%,而外海TP、 COD_{Mn} 、COD浓度较2022年分别升高16.9%、11.5%、0.6%。从COD、 COD_{Mn} 、 NH_3-N 、TP等4个主要污染指标的综合污染指数来看,2018年—2023年滇池综合污染指数呈波动上升趋势,范围为0.82~0.92,处于中污染状态,2023年与2022年相比全湖综合污染指数上升10.16%。

2.1.2 滇池水质时空分布特征

滇池流域旱雨季分明,雨季主要集中在6月—10月。近6年滇池旱季水质有一定改善,但雨季水质波动较大,其中COD和TP更为明显(见图2)。2023年6月、7月滇池湖体出现地表劣V类水,主要波动指标为COD和TP,尤其是2023年7月滇池COD平均浓度达43.6 mg/L,TP平均浓度达0.105 mg/L,均为近6年最高值。

从空间分布上看,2023年6月滇池外海东岸的罗家营、观音山东及滇池南COD浓度较高(45~53 mg/L),草海及外海的滇池南TP浓度较高(0.10~0.12 mg/L);2023年7月滇池外海的灰湾中、观音山中、罗家营COD浓度较高(50~52 mg/L),滇池南TP浓度较高(0.12 mg/L)。2023年7月草海TP浓度有所降低,可能是受到牛栏江—滇池补水的影响,7月牛栏江—滇池补水量较6月增加70%,而草海自身湖

区面积、容积均较小,能较快响应入湖水质和水量的变化^[4]。总体上,滇池外海COD约是草海的2倍,草海的TP浓度比外海高30%左右。滇池湖流主要受风生流控制,吞吐流对其影响较小,西南风为其主导风向,沿湖东岸形成逆时针环流,受排水不畅及西山、海埂大坝等影响,外海北岸、南岸水动力条件较弱,水质相对较差。

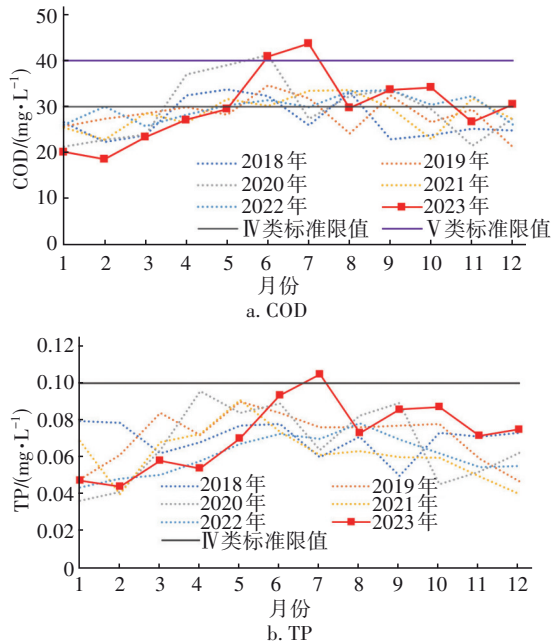


图2 2018年—2023年滇池逐月水质情况

Fig.2 Monthly water quality of Dianchi Lake from 2018 to 2023

2.2 水质波动的主要影响因素分析

2.2.1 气象因素

气象因素与地表水水质密切相关,对滇池近6年气温、降雨量、蒸发量与水质指标进行相关性分析。结果表明,气温与COD_{Mn}、COD、TP、Chla、藻生物量、综合营养状态指数呈极显著正相关;降雨量与COD_{Mn}、COD、综合营养状态指数呈极显著正相关;蒸发量与TP呈正相关,与藻生物量呈负相关;相关性由大到小依次为气温、降雨量、蒸发量。

为排查滇池水质恶化原因,对2018年—2023年昆明市的气温、降雨量和蒸发量进行分析。结果表明,近6年昆明主城区气温呈上升趋势,降雨量和蒸发量波动变化。2023年,昆明主城平均气温为17.2℃,累计降水量为973.1mm(主要集中在8月,约占全年的54%),累计蒸发量为1194.7mm。2023年气温比2018年、2019年、2020年、2021年、

2022年分别上升1.2、0.5、0.7、0.1、0.8℃,相较于多年平均气温(14.7℃)上升2.5℃;降雨量相较于2018年、2020年、2021年、2022年分别下降10.3%、8.4%、5.2%、5.8%,相较于2019年上升15.9%;蒸发量相较于2018年、2020年、2021年、2022年分别上升7.6%、4.1%、0.8%、12.3%,相较于2019年下降13.4%。

总体上,2023年气温较高,为蓝藻生长提供了适宜条件。2023年滇池监测到蓝藻水华62次(其中中度水华1次,轻度水华8次),为近6年监测到蓝藻水华次数最多的年份(见图3);蓝藻生物体富含多种有机质成分,可通过生长代谢、死亡分解等释放到水体中,造成有机质的表征指标COD浓度升高^[5-6]。此外,藻类的繁殖对底泥营养盐形成“泵”吸作用,驱动内源污染物释放^[7]。

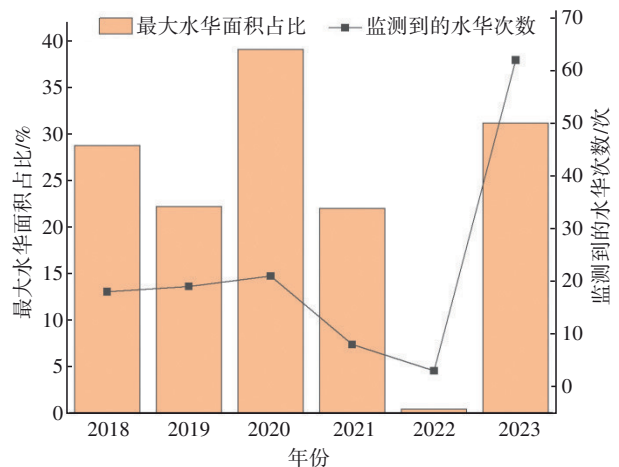


图3 2018年—2023年滇池蓝藻水华次数及最大水华面积占比

Fig.3 Frequency and maximum area proportion of Cyanobacteria blooms in Dianchi Lake from 2018 to 2023

2.2.2 出入湖水量

滇池流域人均水资源量约200m³,水资源开发利用率高75%。为缓解缺水问题,2013年底牛栏江—滇池补水工程通水运行,设计年补水量5.66×10⁸m³^[8]。近6年牛栏江—滇池补水工程水量情况见图4。2018年—2023年牛栏江—滇池补水量约为17.04×10⁸m³,平均每年补水量3.8×10⁸m³。2020年以来,受上游德泽水库蓄水不足影响,牛栏江—滇池补水量大幅减少。2023年,牛栏江—滇池补水量仅有2.47×10⁸m³,为近6年的最小值。其中6月补水量为近6年通水期间逐月最小值,8月牛栏江未向滇

池补水。生态补水量减少,导致河湖水体自净能力降低,是2023年滇池水质恶化的原因之一。

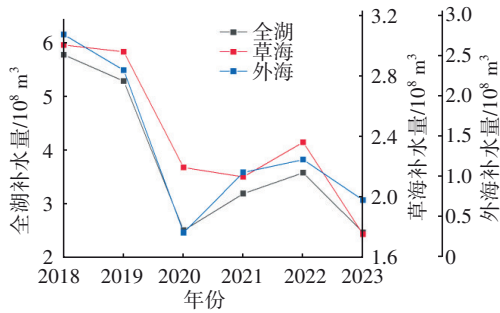


图4 2018年—2023年牛栏江-滇池补水量变化趋势

Fig.4 Variation trend of water quantity of Niulan River-Dianchi River water diversion project from 2018 to 2023

水位是湖泊生态系统的重要参数,浅水湖泊水质与水位的关系尤为密切^[9]。受气象条件和生态补水量影响,近6年滇池水位波动变化明显(见图5)。2023年,草海平均水位为1 886.53 m,为近6年最低值;外海平均水位为1 887.10 m,6月、7月外海水位分别为1 886.81、1 886.90 m,为近6年逐月最低值。

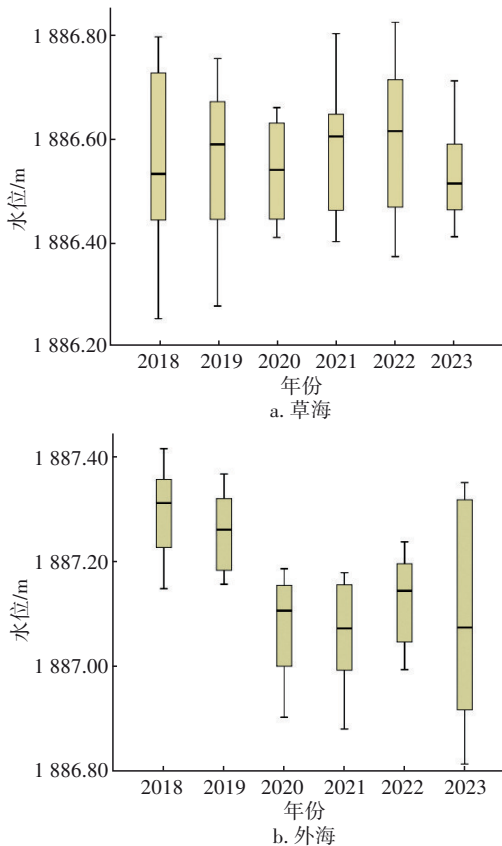


图5 2018年—2023年草海、外海平均水位变化趋势

Fig.5 Variation trend of mean water level in Caohai and Waihai from 2018 to 2023

对滇池近6年水位、牛栏江补水量、海口闸下泄水量与水质指标进行Pearson相关性分析。结果表明,草海水位与 COD_{Mn} 、 COD 、 TP 、藻生物量、综合营养状态指数呈极显著负相关,与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 Chla 呈显著负相关;外海水位与 COD_{Mn} 、 COD 、综合营养状态指数呈极显著负相关;牛栏江-滇池补水水量与 COD_{Mn} 、综合营养状态指数呈极显著负相关;海口闸下泄流量与藻生物量呈显著正相关。尽管水位及出入湖水量与水质的关系十分复杂,但历史数据统计分析表明,牛栏江-滇池补水量越大,或滇池运行水位越高,主要水质指标浓度越低,这与其他学者的研究结论一致^[8,10]。

滇池是半封闭性高原断陷湖泊,出水主要经南部的海口闸排入下游螳螂川。近6年来,海口闸下泄量整体呈下降趋势(见图6),年下泄水量范围为 $(1.55\sim3.73)\times 10^8 \text{ m}^3$,年均下泄水量为 $3.10\times 10^8 \text{ m}^3$ 。2023年海口闸下泄水量为 $1.55\times 10^8 \text{ m}^3$,为近6年的最小值,且下泄水量主要集中在雨季,尤其是8月,其他月份下泄水量相对较少。2023年滇池下泄水量减少,换水周期延长至9.69年,湖泊水体的自净能力下降,水质出现恶化。

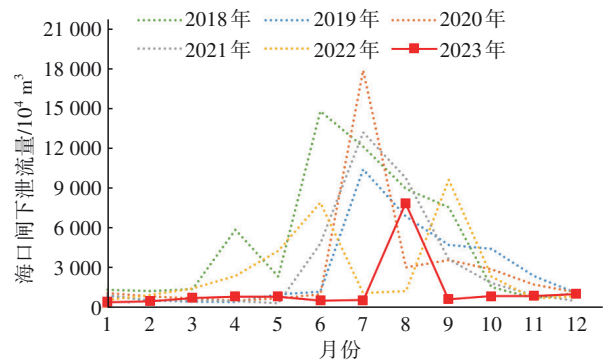


图6 2018年—2023年海口闸下泄水量变化趋势

Fig.6 Change trend of water discharge from Haikou Gate from 2018 to 2023

2.2.3 入湖河道水质水量

入湖河道是外源污染进入滇池的主要通道。2023年,35条主要入湖河道中有26条河道水质达到或优于地表水Ⅲ类,5条河道水质为地表水Ⅳ类,海河和广普大沟2条河道水质为地表水Ⅴ类,五甲宝象河和六甲宝象河2条河道断流。近6年来,入湖河道水体优良率稳步提升,地表Ⅴ类、劣Ⅴ类水体大幅减少,2023年35条河道达标率为93.9%,优良率达78.8%,为2016年设置“优良率”指标以来的

最好水平。但是,从各月优良断面的占比来看,近年来优良断面占比呈上升趋势,但是汛期优良断面比例均较非汛期显著降低,其中2023年汛期较非汛期降低56.2%。这说明目前流域点源污染已得到有效控制,但汛期溢流污染等问题尚未得到有效解决。

为了更客观地评价入湖河道整体水质的变化,对近6年来入湖河道平均水质进行分析,采用滇池流域河道逐月水质水量数据计算水量加权平均水质。结果表明,近6来入湖河道平均水质总体呈改善趋势,但相对于2022年,2023年入湖河道COD浓度上升7.6%(见图7)。

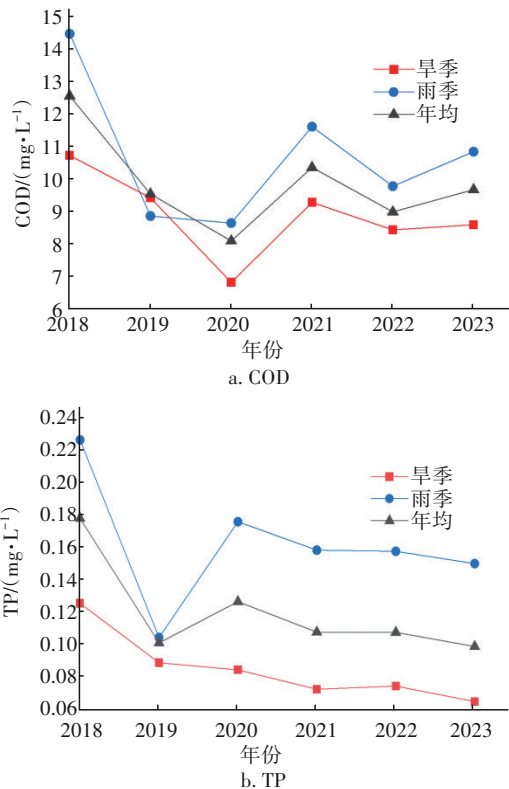


图7 2018年—2023年主要入湖河道水质情况

Fig.7 Water quality of main rivers into Dianchi Lake from 2018 to 2023

从季节上看,河道旱季水质改善明显,COD、TP浓度逐年降低,雨季河道水质则呈波动变化。从空间上看,2023年6月、7月草海入湖河道水质较好,COD为6~12 mg/L(地表水Ⅱ类及以上)、TP为0.024~0.107 mg/L(地表水Ⅲ类及以上);外海北岸和南岸入湖河道水质相对较差,外海北岸河道COD为9~30 mg/L、TP为0.049~0.462 mg/L(广普大沟为地表水劣Ⅴ类),外海南岸河道COD为6.6~22 mg/L、TP

为0.139~0.304 mg/L,说明外海北岸、南岸水质受到入湖河道的影响。

2018年—2023年,滇池流域旱季入湖河流输入污染负荷通量呈下降趋势,雨季出现波动,且雨季入湖污染负荷量明显高于旱季,除2019年外,其他年份的COD、TP雨季入湖负荷量分别是旱季的1.2~2.4、1.6~4.0倍,平均分别为1.5、2.5倍。尽管滇池流域开展了大量截污治污工程,但目前流域截污治污体系仍不完善,雨季河道水质反弹现象突出。2023年,整治过的花渔沟、大清河(明通河)、姚安河、广普大沟4条黑臭水体被列为返黑返臭水体。另外,部分未纳入监管考核的支流沟渠仍存在黑臭问题,如第三轮中央环保督察曝光的老海河和新螺蛳湾排洪沟等,说明流域截污治污体系的建设还需向系统化、精细化推进。

2.3 治理措施及存在的问题

2.3.1 治理措施

“十四五”以来,昆明市坚持污染减排和生态扩容两手发力,统筹水资源利用、水生态保护和水环境治理,继续实施“六个转变”“水质目标和污染物削减双控制”,开展控源截污、尾水入湖、生态修复等工作。

① 控源截污:a. 推进雨污分流和溢流污染管控,2022年—2024年实施昆明城区雨污分流改造提升三年行动,截至2023年12月,完成新建(改造)市政雨污分流管网177.7 km、庭院小区改造5451个;同时,发布实施地方标准《城镇排水系统溢流污染控制技术指南》。b. 强化农业农村面源污染治理控制,推广秸秆还田131.54万亩(1亩≈667 m²,下同),完成测土配方施肥技术推广面积66.44万亩,推广水肥一体化技术2.2万亩,流域内790个自然村实现生活污水处理设施、生活垃圾处理设施和无害化卫生厕所处理设施全覆盖。c. 加强蓝藻防控处置,采用服务购买方式引入社会投资人,建成5.04×10⁴ t/d的虾坝河藻站,依托龙门、虾坝河两座藻站,2021年—2023年累计处理富藻水10178×10⁴ m³,累计处理藻泥42866 t。

② 尾水入湖:a. 成立滇池流域水系联排联调中心,统筹做好“河-湖-厂-网-泵-站-池”一体化调度。b. 推进污水处理厂提标改造,2021年4月发布《昆明市滇池流域城镇污水处理厂尾水提标运行考核办法(试行)》(昆滇指办〔2021〕2号),明确尾水

TP、TN提标的补偿标准,截至2023年12月,滇池流域共有15座污水处理厂完成提标改造,完成总磷提标 $126.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,完成总氮提标 $22.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (3座)。c. 加大污水处理厂尾水入湖水量,2021年、2022年、2023年污水处理厂尾水入湖量分别较2020年增加64%、79%、102%,2021年—2023年调度水质净化厂尾水补给滇池及部分入湖河道约 $14.45 \times 10^8 \text{ m}^3$,促进了水资源的高效利用。

③ 生态修复:a. 划定滇池湖滨生态红线、湖泊生态黄线,印发滇池“三区”管控实施细则,进一步强化空间管控。b. 继续开展湿地建设,2021年—2023年累计完成环滇池湿地建设和提升改造8075亩;针对环保督察指出的滇池“环湖造城”“贴线开发”现象,累计拆除建(构)筑物 $111.9 \times 10^4 \text{ m}^2$,滇池环湖路临湖一侧减少建设用地17250亩、建筑面积 $639 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

2.3.2 面临的问题

① 水资源短缺。滇池位于三大流域分水岭,无大江大河补给,主要依靠汇水区降水补给,缺乏清洁水源,水体自净能力弱^[11]。虽然实施了牛栏江补水、尾水资源化利用等工程,但近年来,受干旱气候及上游德泽水库的影响,牛栏江—滇池补水水量不稳定,2020年和2023年补水量分别仅为设计补水量的44.3%和43.6%。为弥补牛栏江—滇池补水水量的不足,自2021年起增大污水处理厂尾水入湖水量,2021年、2022年、2023年污水处理厂尾水入湖量分别约占尾水总量的60%、67%、77%,但目前滇池流域部分污水处理厂尚未完成提标改造,出水氮、磷浓度相较于湖泊水质仍然有较大的差距,尾水负荷依然是陆域外源入湖污染负荷的重要组成部分^[12]。同时,流域内雨水及再生水综合利用率低、水资源综合调度体系尚未形成,水资源节约集约利用有待加强。

② 水污染防治还存在短板。经过连续5个五年规划的持续大力推进,滇池流域截污治污体系不断完善,污水处理能力也不断提升,但尚存在污水收集处理效能发挥不足、雨季冲击负荷较大、支流沟渠和溢流排口监管有待加强等问题。根据昆明市滇池管理局发布的《昆明市滇池流域城镇污水处理厂运行情况简报(2024年3月)》,截至2024年3月,滇池流域建成运行的水质净化厂达28座,设计处理规模达 $247 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,但约40%的污水处理厂

处于超负荷运行状态,部分污水处理厂运行负荷率较低,尤其是环湖污水处理厂中约有60%负荷率不足50%,存在结构失衡的问题。同时,雨季受溢流和降雨径流污染的冲击,入湖河道、湖体均会发生水质超标的现象,雨季初期最为明显,研究表明草海COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP汛期污染浓度较非汛期分别升高50.3%、69.2%、49.3%,污染主要来自合流制排口以及分流制雨污混接排口等^[13]。

③ 治理措施还需进一步提质增效。“九五”以来,滇池流域共实施规划项目345个,完成投资616.37亿元,但受经济形势影响,“十四五”规划项目总体进展滞后,污染物削减能力较大的污水处理厂建设项目推进缓慢;内源污染严重但滇池底泥疏浚工程却因底泥出路问题,未持续推进;城市面源、雨污分流等工程虽已投入大量资金,但溢流和面源治理难度极大,目前资金效益尚未充分发挥;农业面源污染防治措施点多面广,系统科学性不强,管控成效仍不明显;农村污水处理设施覆盖面虽广,但运行维护管理不到位、已建设施闲置等问题仍然存在。

2.4 对策建议

① 拓宽滇池补水水源,优化水资源调度和配置。实施清污剥离,充分挖掘用好流域内清水资源,拓宽滇池补水水源,减少对牛栏江补水的依赖,优化水位水量调度,增强湖体水动力,提升湖内水循环;统筹做好自然水和社会水的联排联调,科学统筹、合理调度好有限的水资源,让更多清水补给滇池;合理高效利用污水处理厂尾水资源,进一步优化运行、强化监管,确保尾水氮磷浓度达到最优水平;雨污分流改造完成后,因地制宜地打开封堵雨水口,调度清洁雨水入河入湖;建设雨水快速净化设施最大限度截留处理初期雨水,将降雨后期微污染雨水中的固体颗粒杂质截留后补入河道、滇池湖体;提高城市再生水利用率,优化和完善再生水处理站及供水管网,提高供水管网覆盖率,探索构建再生水先回灌河道改善水环境再进行企业利用的复用模式;坚持节水优先,推进节水型社会创建,实施农业、工业和城乡节水技术改造。通过以上措施,实现生态水位日保障程度100%,将水体置换周期控制在2.5年内,重构流域水循环体系,生态补给水量进一步增加。

② 补齐污染治理短板,降低汛期污染强度。

完善“源-厂-网-河-湖”一体化的滇池流域污水收集、处理及资源回用体系,强化污水处理厂联合调度运行能力,提升污水处理效能。加快推进滇池流域各区域雨污分流提升改造工程建设,工程实施完成后,系统开展雨污分流效果评估工作,根据评估结果,查缺补漏,提升工程效能。根据滇池流域污水处理厂分布情况、旱雨季收水量及厂间调度的可行性,加强主城西片三-九-十三水质净化厂、主城北片四-五-十四水质净化厂、主城东南片十一-十二-倪家营水质净化厂之间的联合调度。对现状运行负荷率较低的污水处理厂开展“一厂一策”专题研究,从完善收集系统、提升污水转输调度能力等方面提升污水处理效率。实施环湖截污东岸、南岸管道连通工程,将东岸、北岸超出处理能力的污水调度至南岸的污水厂处理。开展排水管网健康度排查,按照“一河一策、一沟一策”的思路,加强河道专项治理,全面消除黑臭水体,保障长制久清。加大海绵城市建设及雨水径流污染防控力度,实现雨水调蓄和径流污染强化净化,结合调蓄池建设雨水快速处理设施,在新建工程及雨污分流、老旧小区改造、城市更新改造等项目建设中落实海绵城市建设理念。强化污涝共治,按照“一点一策”的原则,加快推进滇池流域重点内涝积水点整治工作,逐步降低内涝程度,减少内涝次数。加强蓝藻综合治理,推进湖内水生态修复,提升内源污染防治水平。通过以上措施,城市生活污水处理率达到98%以上,城市面源污染治理率提升到50%以上,溢流污染得到有效管控,城市黑臭水体被全面消除。

③ 精准治理,实现资源配置效率最优化和效益最大化。加强滇池治理措施的绩效评价和跟踪评估,最大化发挥治理资金的使用效益。因地制宜地推进已建污水处理厂的提标改造,全面加强村庄生活污水收集处理设施的建设,进一步强化现有设施运维管护,对现有处理设施运行情况进行评估,对运行效能不足、冗余的设施建立退出机制;疏通底泥资源化利用渠道,综合采取生态疏浚等措施,分阶段、分片区推进草海及外海入湖河口等重点区域的底泥疏浚工作。同时,在资金短缺的形势下,拓宽资金渠道,增强融资能力。找准政策切入点,精心包装储备项目,挖掘滇池保护治理项目的收益点,充分释放政策红利,吸引社会资本投入,构建产业融合点,提升区域生态价值转化能力。通过以上

措施,充分发挥治理资金使用效益,可实现湖泊保护治理,公众满意度提升至95%以上。

3 结论

经过30年的治理,滇池水环境改善明显,但2023年6月、7月出现地表水劣V类水,主要原因包括:①2023年气温较历史同期升高 2.5°C ,受高温影响,蓝藻水华为近6年之最,同时6月—7月滇池蓝藻迅速增殖,6月湖体更是出现中度水华,蓝藻在湖内蓄积、腐败,增加了湖体内源污染。②受降雨减少影响,2023年牛栏江-滇池补水水量为近6年最小值,同时为维持水位,海口闸下泄量亦为近6年最小值,出、入湖水量减少,导致换水周期延长至9.69年,湖体水动力减弱,污染物浓缩效应增强,湖体自净能力降低。③污染治理还存在短板,2023年旱涝急转的气象特征,形成较强的雨季冲击负荷,导致河道雨季水质较旱季明显恶化,雨季入湖污染负荷是旱季的1.5~2.5倍。同时,污水处理规模可观,但收集处理效能不足,流域内约40%的污水处理厂超负荷运行,环湖约60%的污水处理厂负荷不足50%。另外,滇池治理工程中关键的点源、面源和内源污染削减工程未达到“十四五”规划预期。

针对水质波动的主要原因,结合现阶段滇池治理存在的问题,建议从加强水资源保障、补齐污染治理短板、提升治理资金使用效益等方面做好滇池水生态保护修复工作,支撑滇池水质持续向好。

参考文献:

- [1] 代晓颖,徐栋,武俊梅,等. 2015—2019年武汉市湖泊水质时空变化[J]. 湖泊科学, 2021, 33(5): 1415-1424.
DAI Xiaoying, XU Dong, WU Junmei, et al. Spatiotemporal variations of water quality of lakes in Wuhan from 2015 to 2019[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(5): 1415-1424(in Chinese).
- [2] 王燕,刘彦斌,赵红雪,等. 宁夏沙湖水水质评价及水污染特征[J]. 湿地科学, 2020, 18(3): 362-367.
WANG Yan, LIU Yanbin, ZHAO Hongxue, et al. Water quality assessment and characteristics of water pollution of Sand Lake in Ningxia[J]. Wetland Science, 2020, 18(3): 362-367(in Chinese).
- [3] 吴雪,何佳,张英,等. 滇池流域河道生态补偿机制成效评价与完善对策[J]. 人民长江, 2024, 55(3): 68-73.

- WU Xue, HE Jia, ZHANG Ying, *et al.* Evaluation and improvement measures on ecological compensation mechanism for rivers in Dianchi basin [J]. *Yangtze River*, 2024, 55(3): 68-73 (in Chinese).
- [4] 李翰卿. 滇池草海水动力及水体置换数值模拟研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- LI Hanqing. Numerical Simulation Study on the Dynamics of Caohai Water and Water Replacement in Dianchi Lake [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022 (in Chinese).
- [5] 施文卿, 秦伯强. 气候变化下湖库蓝藻水华发展趋势及防控对策 [J]. *水利学报*, 2023, 54(8): 987-996.
- SHI Wenqing, QIN Boqiang. Cyanobacterial blooms in lakes and reservoirs under climate change: future trend and control strategy [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(8): 987-996 (in Chinese).
- [6] ADAMS L J, TIPPING E, FEUCHTMAYR H, *et al.* The contribution of algae to freshwater dissolved organic matter: implications for UV spectroscopic analysis [J]. *Inland Waters*, 2018, 8(1): 10-21.
- [7] 杨苏文, 金位栋, 闫玉红, 等. 湖泊理论藻源内负荷估算方法研究 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(1): 271-283.
- YANG Suwen, JIN Weidong, YAN Yuhong, *et al.* Theoretic estimation method of algae derived loading for lakes [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(1): 271-283 (in Chinese).
- [8] 毛建忠, 孙燕利, 贺克雕, 等. 牛栏江-滇池补水工程对滇池外海的水环境改善效果研究 [J]. *水资源保护*, 2017, 33(2): 47-51.
- MAO Jianzhong, SUN Yanli, HE Kediao, *et al.* Study of water environment improvement effect by Niulan River-Dianchi Lake water supplement project in Waihai area of Dianchi Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(2): 47-51 (in Chinese).
- [9] 赵思远, 唐颖栋, 唐晓斌, 等. 茅洲河流域再生水补水方案研究与实践 [J]. *中国给水排水*, 2024, 40(12): 128-136.
- ZHAO Siyuan, TANG Yingdong, TANG Xiaobin, *et al.* Research and practice of reclaimed water replenishment in Maozhou River basin [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(12): 128-136 (in Chinese).
- [10] 王丽霞, 程晨, 鲁露, 等. 滇池外海水位变化及其对水质的影响 [J]. *绿色科技*, 2023, 25(20): 1-6, 27.
- WANG Lixia, CHENG Chen, LU Lu, *et al.* Water level changes and their impact on water quality of Dianchi Waihai Lake [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2023, 25(20): 1-6, 27 (in Chinese).
- [11] 杨智, 陈欣, 周云, 等. 云南高原湖泊高水平保护与流域高质量发展策略研究 [J]. *中国水利*, 2023(17): 63-66.
- YANG Zhi, CHEN Xin, ZHOU Yun, *et al.* Strategic research for high-level protection and high-quality basin development of plateau lakes in Yunnan Province [J]. *China Water Resources*, 2023(17): 63-66 (in Chinese).
- [12] 吴雪, 何佳, 徐晓梅, 等. 滇池流域污水厂尾水污染负荷特征分析 [J]. *中国给水排水*, 2018, 34(17): 69-73.
- WU Xue, HE Jia, XU Xiaomei, *et al.* Pollution characteristics of tail water from wastewater treatment plants in Dianchi watershed [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(17): 69-73 (in Chinese).
- [13] YANG C H, LI J Y, YIN H B. Phosphorus internal loading and sediment diagenesis in a large eutrophic lake (Lake Chaohu, China) [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 292: 118471.

作者简介: 吴雪(1986-), 女, 云南红河人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水环境系统分析、湖泊科学、环境规划与管理。

E-mail: stellawu7@126.com

收稿日期: 2024-08-08

修回日期: 2024-09-02

(编辑: 丁彩娟)